

Ảnh hưởng của tro bay và phụ gia chống thấm WP307 đến cường độ nén và độ chống thấm nước của bê tông xi măng

Effects of fly ash and WP307 waterproofing admixture on the compressive strength and water impermeability of cement concrete

> TS BÙI THỊ QUỲNH ANH^{1,*}, HOÀNG MẠNH HÙNG²

¹Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải

²Công ty Cổ phần Đường sắt Hà Thái

*Email: quynhanhbt@utt.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của tro bay và phụ gia chống thấm WP307 đến cường độ nén 28 ngày và khả năng chống thấm nước của bê tông xi măng, định hướng ứng dụng cho kết cấu ngầm giao thông. Chương trình thí nghiệm gồm 9 cấp phối với 3 mức hàm lượng tro bay và 3 mức hàm lượng WP307. Cường độ nén được xác định theo TCVN 3118, trong khi độ chống thấm được đánh giá theo TCVN 3116 bằng phương pháp vệt thấm. Kết quả cho thấy tro bay làm giảm nhẹ cường độ nén nhưng cải thiện khả năng chống thấm. WP307 có ảnh hưởng rõ rệt hơn đến độ sâu vệt thấm và là yếu tố chi phối chính đối với tính chống thấm của bê tông. Vùng thành phần phù hợp bước đầu được đề xuất là 15 - 20% tro bay kết hợp với 0,3 - 0,6% WP307 theo khối lượng chất kết dính.

Từ khóa: Bê tông xi măng; tro bay; phụ gia chống thấm; cường độ nén; độ chống thấm nước; công trình ngầm giao thông.

ABSTRACT

This study evaluates the effects of fly ash and WP307 waterproofing admixture on the 28-day compressive strength and water impermeability of cement concrete for potential use in underground transportation structures. The experimental program included nine mixtures with three levels of fly ash and three levels of WP307 dosage. Compressive strength was determined in accordance with TCVN 3118, while water impermeability was assessed according to TCVN 3116 using the water penetration depth method. The results indicate that fly ash slightly reduced compressive strength but improved water resistance. WP307 showed a stronger effect on penetration depth and was identified as the dominant factor affecting impermeability. An initial suitable composition range is proposed at 15 - 20% fly ash combined with 0.3 - 0.6% WP307 by binder mass.

Keywords: Cement concrete; fly ash; waterproofing admixture; compressive strength; water impermeability; underground transportation structures.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong các công trình ngầm giao thông, bê tông không chỉ bảo đảm khả năng chịu lực mà còn phải đáp ứng yêu cầu kín nước trong điều kiện thường xuyên chịu tác động của nước ngầm, áp lực nước và môi trường ẩm ướt kéo dài. Khi khả năng chống thấm không đạt yêu cầu, nước có thể xâm nhập qua hệ lỗ rỗng và vi khe nứt, làm tăng nguy cơ rò rỉ, ẩm mốc, suy giảm độ bền lâu và chi phí sửa chữa. Vì vậy, cùng với cường độ chịu lực, độ chống thấm là một chỉ tiêu kỹ

thuật quan trọng đối với bê tông dùng cho các kết cấu ngầm giao thông, đặc biệt là hầm, tường vây, sàn đáy và các công trình ngầm đô thị.

Khả năng chống thấm của bê tông phụ thuộc vào cấu trúc lỗ rỗng, mức độ liên thông mao quản, tỷ lệ nước/chất kết dính, chất lượng vùng tiếp xúc hồ xi măng - cốt liệu và sự hiện diện của phụ gia khoáng hoặc phụ gia hóa học. Trong các giải pháp đang được quan tâm, việc sử dụng tro bay thay thế một phần xi măng kết hợp

với phụ gia chống thấm là hướng tiếp cận có tiềm năng do vừa có thể cải thiện vi cấu trúc bê tông, vừa giảm lượng xi măng sử dụng. Nhiều nghiên cứu cho thấy tro bay ở mức thay thế trung bình có thể giúp giảm tính thấm và nâng cao độ bền lâu nếu được bảo dưỡng phù hợp, tuy nhiên hiệu quả còn phụ thuộc vào loại tro bay, tỷ lệ thay thế và điều kiện dưỡng hộ [5-7]. Ngoài ra, TCVN 13568 cũng khuyến nghị sử dụng tro bay kết hợp với phụ gia hóa học và kiểm tra đồng thời các chỉ tiêu cường độ, độ chống thấm khi áp dụng cho bê tông công trình. Bên cạnh đó, phụ gia chống thấm có thể làm giảm tính thấm thông qua cải thiện cấu trúc lỗ rỗng hoặc cản trở đường dẫn thấm, song hiệu quả vẫn phụ thuộc vào liều lượng sử dụng và tính tương thích với hệ chất kết dính.

Ở Việt Nam, một số nghiên cứu đã xem xét khả năng thấm hoặc xâm nhập của các tác nhân bất lợi trong bê tông, chẳng hạn thông qua các chỉ tiêu liên quan đến ion clorua [8]. Tuy nhiên, hiện chưa có nhiều nghiên cứu trong nước đánh giá trực tiếp ảnh hưởng của tro bay và phụ gia chống thấm đến khả năng chống thấm nước của bê tông xi măng theo TCVN 3116:2022 [3], đặc biệt theo phương pháp vết thấm. Đây là phép thử có ý nghĩa thực tiễn vì phản ánh trực tiếp khả năng kín nước của bê tông cứng dưới áp lực nước, phù hợp với yêu cầu kiểm chứng cấp phối cho các kết cấu ngầm.

Nghiên cứu này tập trung làm rõ ảnh hưởng của hàm lượng tro bay và phụ gia chống thấm WP307 đến cường độ nén 28 ngày và khả năng chống thấm nước của bê tông xi măng theo TCVN 3116:2022 [3]. Trên cơ sở đó, nghiên cứu hướng tới để xuất khoảng thành phần phù hợp nhằm cân bằng giữa yêu cầu chịu lực và yêu cầu kín nước. Kết quả thu được có thể được sử dụng như cơ sở tham khảo bước đầu cho lựa chọn cấp phối bê tông dùng trong công trình ngầm giao thông trong điều kiện vật liệu và khí hậu ở Việt Nam.

2. THÍ NGHIỆM

2.1. Kế hoạch thí nghiệm

Ma trận cấp phối gồm 9 tổ hợp (3 mức hàm lượng tro bay \times 3 mức hàm lượng WP307). Để đảm bảo độ tin cậy thống kê tối thiểu, mỗi cấp phối được bố trí 3 mẫu cho mỗi chỉ tiêu thí nghiệm ở tuổi 28 ngày. Kế hoạch thí nghiệm được tóm tắt trong Bảng 1.

Bảng 1. Kế hoạch thí nghiệm và số lượng mẫu dự kiến (tuổi 28 ngày)

STT	Chỉ tiêu	Tiêu chuẩn	Tuổi (ngày)	Số mẫu cho 1 cấp phối	Tổng số mẫu
1	Cường độ nén bê tông	TCVN 3118	28	3	27
2	Khả năng chống thấm nước (vết thấm)	TCVN 3116	28	3	27

2.2. Vật liệu

Xi măng sử dụng trong nghiên cứu là xi măng poóc-lăng hỗn hợp PCB40 Bim Sơn, được sản xuất phù hợp với TCVN 6260 [2]. Tro bay sử dụng được thu hồi từ Nhà máy Nhiệt điện Vũng Áng bằng hệ thống lọc bụi tĩnh điện và được dùng như phụ gia khoáng thay thế một phần xi măng, phù hợp để sử dụng trong bê tông theo TCVN 10302:2014. Cốt liệu nhỏ là cát vàng thô đã được sàng rửa, cốt liệu lớn là đá dăm nghiền từ đá gốc cứng phù hợp sử dụng cho bê tông kết cấu theo TCVN 7570:2006 [1]. Nước trộn bê tông là nước sạch có chất lượng tương đương nước sinh hoạt, không chứa các tạp chất gây ảnh hưởng bất lợi đến quá trình đông kết và phát triển cường độ của bê tông. Nghiên cứu sử dụng đồng thời phụ gia siêu dẻo BestFlow R342 (giữ mức cố định để ổn định tính công tác) và phụ gia chống thấm tích hợp BestProof WP307 (thay đổi tỉ lệ sử dụng, là biến đầu vào của nghiên cứu).

Bảng 2. Tính chất chính của phụ gia hóa học sử dụng trong nghiên cứu

Chỉ tiêu	BestFlow R342	BestProof WP307
Tên thương mại	BestFlow R342	BestProof WP307
Nhà sản xuất/phân phối	Bestmix, Việt Nam	Bestmix
Nhóm phụ gia	Phụ gia siêu dẻo duy trì độ sụt	Phụ gia chống thấm tích hợp
Cơ sở hóa học	Polycarboxylate ester	Hệ hoạt tính vô cơ/hữu cơ
Dạng vật lý	Dung dịch lỏng nhớt	Dung dịch lỏng/huyền phù
Màu sắc	Nâu nhạt	Nâu nhạt/xám nhạt
pH ở 20°C	4,28	11-13
Hàm lượng ion Cl ⁻	Trong giới hạn TCVN 8826:2011	$\leq 0,1\%$ hoặc không chứa ion Cl ⁻ gây ăn mòn cốt thép

2.3. Quá trình tạo mẫu và thí nghiệm

Các hỗn hợp bê tông được chế tạo theo cấp phối đã thiết kế, trong đó kiểm soát tỷ lệ nước/chất kết dính và tính công tác nhằm hạn chế sai khác giữa các mẻ trộn. Sau khi trộn, bê tông được đúc mẫu, đầm chặt và bảo dưỡng đến tuổi thí nghiệm theo quy định. Cường độ nén được xác định ở tuổi 28 ngày trên mẫu lập phương (150×150×150)mm theo TCVN 3118, với giá trị trung bình của tối thiểu 3 mẫu cho mỗi cấp phối.

Khả năng chống thấm nước được đánh giá ở tuổi 28 ngày theo TCVN 3116:2022 bằng phương pháp vết thấm, sử dụng mẫu trụ tròn D150×H150 mm, với tối thiểu 3 mẫu cho mỗi cấp phối. Mẫu được chuẩn bị để nước chỉ thấm qua một mặt chịu áp lực. Sau thí nghiệm, mẫu được tách để xác định vùng thấm ướt và đo độ sâu vết thấm. Độ sâu vết thấm được dùng làm chỉ tiêu so sánh khả năng chống thấm giữa các cấp phối.



Hình 1. Thí nghiệm thấm mẫu BTXM theo TCVN 3116

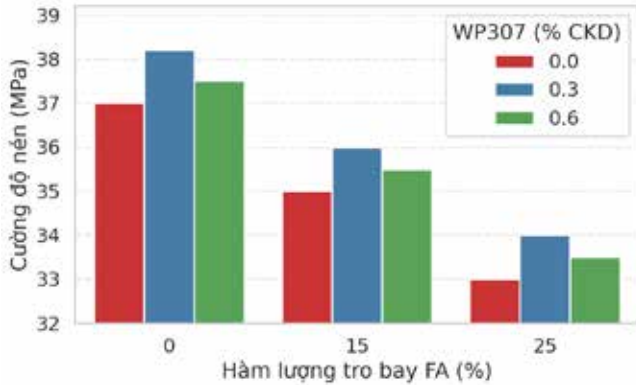
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Ảnh hưởng của tro bay và WP307 đến cường độ nén 28 ngày

Kết quả thí nghiệm cho thấy hàm lượng tro bay có ảnh hưởng nhất định đến cường độ nén ở tuổi 28 ngày của bê tông. Khi tăng FA từ 0 lên 15% và 25% khối lượng chất kết dính, cường độ nén có xu hướng giảm dần ở cả ba mức WP307, với mức giảm khoảng 2 - 4 MPa. Xu hướng này phù hợp với bản chất của hệ chất kết dính có tro bay, trong đó việc thay thế một phần clinker bằng pha khoáng phản ứng chậm làm giảm tốc độ phát triển cường độ ở tuổi 28 ngày. Tuy nhiên, mức suy giảm không lớn và các cấp phối sử dụng FA trong khoảng 15 - 25% vẫn duy trì được cường độ tương đương bê tông mác B30-B35, cho thấy việc sử dụng tro bay trong phạm vi khảo sát chưa làm mất khả năng đáp ứng yêu cầu chịu lực cơ bản của bê tông.

Xét riêng ảnh hưởng của phụ gia chống thấm WP307, kết quả cho thấy tại cùng một mức tro bay, khi tăng hàm lượng WP307 từ 0 lên 0,3% khối lượng chất kết dính thì cường độ nén đều tăng nhẹ, khoảng 1,0 - 1,2 MPa so với mẫu không dùng phụ gia. Điều

này cho thấy WP307 có thể góp phần cải thiện độ đặc chắc của cấu trúc bê tông, qua đó bù lại một phần xu hướng suy giảm cường độ do tro bay gây ra. Khi tiếp tục tăng WP307 lên 0,6%, cường độ nén giảm nhẹ so với mức 0,3%, nhưng vẫn cao hơn hoặc xấp xỉ mẫu không dùng phụ gia tại cùng hàm lượng FA. Như vậy, trong phạm vi nghiên cứu, hàm lượng WP307 khoảng 0,3% có thể xem là mức hợp lý hơn xét riêng theo chỉ tiêu cường độ nén 28 ngày.

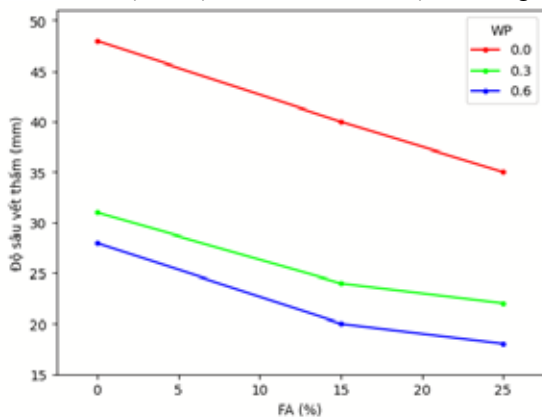


Hình 2. Cường độ nén 28 ngày của các cấp phối theo hàm lượng FA và WP307

3.2. Ảnh hưởng của tro bay và WP307 đến độ chống thấm nước của bê tông

So với cường độ nén, ảnh hưởng của hai biến nghiên cứu đến độ chống thấm thể hiện rõ rệt hơn nhiều. Kết quả cho thấy khi tăng hàm lượng tro bay từ 0 đến 25%, độ sâu vết thấm giảm đáng kể. Xu hướng này cho thấy tro bay đã góp phần cải thiện cấu trúc lỗ rỗng liên thông trong bê tông, thông qua hiệu ứng lấp đầy và phản ứng pozzolan, từ đó hạn chế sự xâm nhập của nước dưới áp lực.

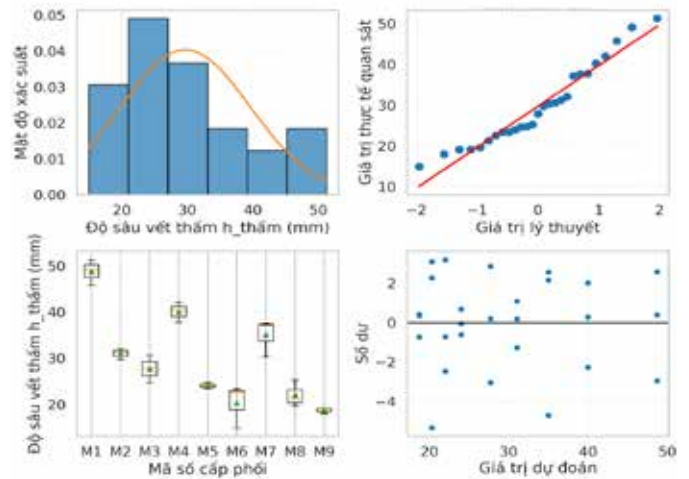
Ảnh hưởng của WP307 còn rõ ràng hơn. Khi tăng hàm lượng WP307 từ 0 lên 0,3% và 0,6%, độ sâu vết thấm giảm mạnh ở tất cả các mức tro bay, trong khi cường độ nén chỉ biến động nhỏ. Kết quả này cho thấy WP307 là nhân tố chi phối chính đối với khả năng chống thấm của bê tông trong khung thí nghiệm của nghiên cứu. Về cơ chế, có thể hiểu rằng phụ gia chống thấm đã hỗ trợ làm giảm mức độ liên thông của mao quản và các kênh thấm mịn trong đá xi măng, qua đó làm tăng khả năng cản nước dưới áp lực. Đây cũng là lý do vì sao cùng một mức FA, sự thay đổi WP307 tạo ra khác biệt lớn hơn nhiều về độ sâu vết thấm so với khác biệt về cường độ nén.



Hình 3. Độ sâu vết thấm của các cấp phối theo hàm lượng FA và WP307

3.3. Phân tích thống kê ảnh hưởng của FA và WP307 đến độ sâu vết thấm

Các kiểm định sơ bộ ở Hình 4 cho phép sử dụng các phương pháp ANOVA và hồi quy tuyến tính để phân tích sâu hơn ảnh hưởng của FA và WP307 đến khả năng chống thấm của bê tông.



Hình 4. Kết quả kiểm định giả thuyết thống kê

3.3.1. Phân tích anova

Kết quả ANOVA (Bảng 3) cho thấy mô hình có ý nghĩa thống kê rất cao ($F=111,85, p<0,001$). Cả hàm lượng FA ($F=50,46, p<0,001$) và hàm lượng WP ($F=173,25, p<0,001$) đều ảnh hưởng có ý nghĩa đến biến đáp ứng, trong đó WP là yếu tố chi phối mạnh hơn. Ngược lại, tương tác FA \times WP không có ý nghĩa thống kê ($F=1,09; p=0,39$). Mô hình có độ phù hợp cao với $R^2=96,17\%$, $R^2_{adj}=94,24\%$, cho thấy khả năng mô tả và dự báo tốt trong phạm vi nghiên cứu.

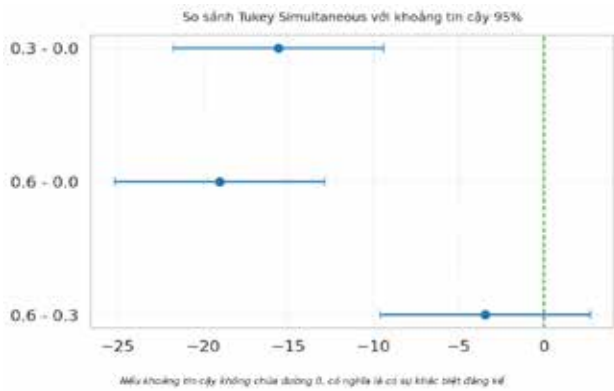
Bảng 3. Kết quả phân tích ANOVA

Nguồn	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Linear	4	2382.81	595.70	111.85	0.000
Hàm lượng FA	2	537.49	268.74	50.46	0.00
Hàm lượng WP	2	1845.33	922.66	173.25	0.00
2-Way Interactions	4	23.21	5.80	1.09	0.39
FA * WP	4	23.21	5.80	1.09	0.39
Sai số	18	95.86	5.33		
Tổng	26	2501.89			

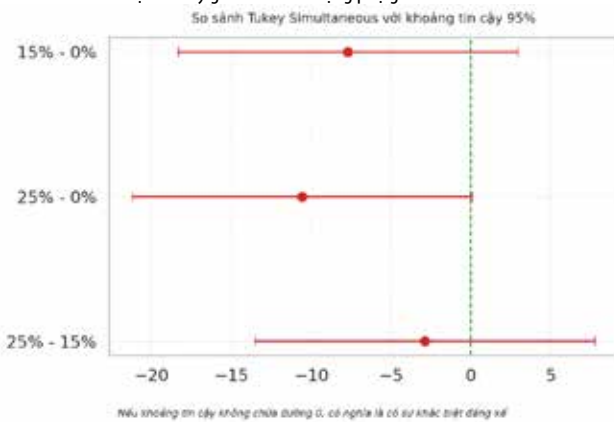
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
2.31	96.17%	94.47%	94.24%

3.3.2. Kiểm định Tukey

Kết quả so sánh Tukey (Hình 5 và 6) ở mức tin cậy 95% cho thấy WP307 làm giảm rõ rệt độ sâu vết thấm. Hai cặp so sánh giữa mẫu không dùng phụ gia với các mẫu dùng 0,3% và 0,6% WP307 đều có khác biệt có ý nghĩa thống kê, trong khi chênh lệch giữa 0,3% và 0,6% WP307 chưa có ý nghĩa rõ rệt. Đối với tro bay, độ sâu vết thấm có xu hướng giảm khi tăng FA, nhưng các khác biệt giữa các mức FA chưa đạt ý nghĩa thống kê. Nhìn chung, kết quả kiểm định Tukey phù hợp với ANOVA khi cho thấy WP307 là yếu tố chi phối chính đối với độ sâu vết thấm, còn ảnh hưởng của FA yếu hơn.



Hình 5. Kiểm định Tukey giữa các hàm lượng phụ gia WP307 khác nhau



Hình 6. Kiểm định Tukey giữa các hàm lượng tro bay khác nhau

3.3.3. Xây dựng mô hình hồi quy

Ngoài ANOVA, nghiên cứu còn xây dựng mô hình hồi quy bậc hai gồm các thành phần FA, WP, FA², WP², FA-WP để mô tả quan hệ giữa thành phần vật liệu và độ sâu vết thấm. Mô hình hồi quy bậc hai (Bảng 4) cho hệ số xác định hiệu chỉnh R²_{adj}=0,974, cho thấy khả năng mô tả rất tốt trong phạm vi dữ liệu thí nghiệm.

Bảng 4. Kết quả các hệ số của trong mô hình hồi quy

Số hạng	Ảnh hưởng	Hệ số	Hệ số SE	Giá trị T	Giá trị P
Hằng số		48.365	0.774	62.50	0.000
FA	-1.632	-0.816	0.106	-7.66	0.000
WP	-136.003	-68.001	4.413	-15.41	0.000
FA*FA	0.022	0.011	0.004	2.71	0.013
FA*WP	107.164	53.582	6.649	8.06	0.000
FA*WP	0.898	0.449	0.112	4.01	0.001

Chỉ tiêu	Giá trị		
S =	1.46572		
R-sq =	97.93%	R-sq(adj) =	97.43%

Phương trình hồi quy:

$$h_{\text{tham}} = 48.489 - 0.734 \text{ FA} - 76.014 \text{ WP} + 0.009 \text{ FA}^2 + 67.284 \text{ WP}^2 + 0.298 \text{ FA*WP}$$

Trên cơ sở đánh giá đồng thời cường độ nén 28 ngày và độ sâu vết thấm, vùng thành phần phù hợp được đề xuất là FA khoảng 15 - 20% kết hợp với WP307 ở mức 0,3 - 0,6% khối lượng chất kết

dính. Vùng này cho thấy khả năng cân bằng tương đối tốt giữa yêu cầu chịu lực và chống thấm của bê tông. Tuy nhiên, kết luận hiện mới dựa trên hai chỉ tiêu ở tuổi 28 ngày và trên một hệ vật liệu cụ thể; do đó cần tiếp tục nghiên cứu các chỉ tiêu độ bền lâu cũng như hành vi thấm tại mối nối, khe co giãn và các chi tiết neo thép trước khi áp dụng rộng rãi.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã đánh giá ảnh hưởng của hàm lượng tro bay và phụ gia chống thấm WP307 đến cường độ nén 28 ngày và khả năng chống thấm nước của bê tông xi măng theo TCVN 3116:2022.

Kết quả cho thấy khi tăng hàm lượng tro bay từ 0 đến 25%, cường độ nén có xu hướng giảm nhẹ, nhưng độ sâu vết thấm giảm rõ rệt.

Phụ gia WP307 có tác động tích cực hơn đến khả năng chống thấm; việc bổ sung phụ gia ở mức 0,3% và 0,6% đều làm giảm có ý nghĩa độ sâu vết thấm so với mẫu không sử dụng phụ gia.

Phân tích ANOVA và kiểm định so sánh cặp cho thấy WP307 là yếu tố chi phối chính đối với độ sâu vết thấm, còn ảnh hưởng của tro bay tồn tại nhưng yếu hơn.

Kết quả nghiên cứu là cơ sở tham khảo cho lựa chọn cấp phối bê tông dùng trong các kết cấu ngầm giao thông yêu cầu độ kín nước cao.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] TCVN 7570:2006: Cốt liệu cho bê tông và vữa - Yêu cầu kỹ thuật.
 [2] TCVN 6260:2020: Xi măng poóc lăng hỗn hợp - Yêu cầu kỹ thuật.
 [3] TCVN 3116:2022: Bê tông - Phương pháp xác định độ chống thấm nước - Phương pháp vết thấm.
 [4] TCVN 9345:2012: Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép - Hướng dẫn kỹ thuật phòng chống nứt dưới tác động của khí hậu nóng ẩm.
 [5] A Elahi, PAM Basheer, SV Nanukuttan, QUZ Khan. Mechanical and durability properties of high performance concretes containing supplementary cementitious materials. Construction and Building Materials, vol. 24, Issue 3, pp. 292-299, March 2010.
 [6] ALA Fraay, JM Bijen, YM De Haan. The reaction of fly ash in concrete: A critical examination. Cement and Concrete Research, vol. 19, Issue 2, pp. 235-246, March 1989.
 [7] C Van Nguyen, P Lambert, Q Hung Tran. Effect of Vietnamese fly ash on selected physical properties, durability and probability of corrosion of steel in concrete. Materials, 12(4), 593, 2019.
 [8] Nguyễn Văn Chính, Đặng Văn Mến. Ảnh hưởng của tro bay nhiệt điện Duyên Hải đến cường độ chịu nén và khả năng chống thấm của bê tông, Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng, số 17, tr. 11-14, 2019.